

## オペラ歌唱における頸椎後弯を用いた音高調節機構の検討\*

◎戸田菜月, 竹本浩典 (千葉工大), 高橋純 (大阪芸大)

### 1 はじめに

オペラ歌唱は、豊かな声量や高音でも厚みのある歌声が特徴である[1]。これらは、声道形状やその周囲の組織を時間的・空間的に高い精度で制御することによって実現していると考えられるが、その詳細は明らかではない。

近年、磁気共鳴画像法 (MRI: Magnetic Resonance Imaging) による実時間動画撮像法 (rtMRI) が発展し、歌唱時の体内運動を観測することが可能となった[2]。そこでわれわれはこれまでに rtMRI でオペラ歌唱における体内運動について研究してきた[3]。その結果の一つとして、音高の上昇とともに頸椎が後弯することが明らかとなった[4]。音高の制御は通常、輪状甲状筋 (CT 筋) が声帯を伸長させ、甲状披裂筋 (TA 筋) が声帯を短縮することで行われるが、頸椎の前弯を利用して甲状軟骨と輪状軟骨の角度を変え、声帯を短縮することで音高を下降させる[5]。同様に、頸椎の後弯を利用して音高を調節するメカニズムの存在が考えられたが、rtMRI では喉頭軟骨のコントラストが低く、頸椎後弯にともなう喉頭軟骨の動きを計測できなかった。

そこで本研究では、rtMRI と比較して喉頭軟骨のコントラストが高い静止画の撮像法を試験的に導入した。そして、1名のプロのオペラ歌手が指定された音高で发声中の喉頭周辺の撮像を繰り返し行い、音高上昇とともに喉頭軟骨、舌骨、頸椎の輪郭を抽出して予備的に分析したので報告する。

### 2 方法

#### 2.1 実験参加者と歌唱課題

実験参加者はプロのバリトン 1 名である。実験参加者は、C4 (262 Hz), C#4 (277 Hz), D4 (294 Hz), D#4 (311 Hz), E4 (330 Hz), F4 (349 Hz), F#4 (370 Hz), G4 (392 Hz) の音高でそれぞれ約 3 秒ずつ、母音/a/でロングトーンを行った。なお、実験参加者の内観報告によれば、声区転換点は F4 であった。

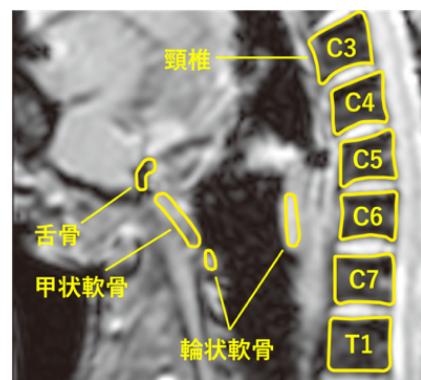


Fig. 1 MRI 画像から抽出した各部位の輪郭

#### 2.2 MRI 撮像

実験参加者は MRI 装置内で仰臥して歌唱課題を行い、各音でロングトーン中の喉頭とその周囲の組織を正中矢状断面で撮像した。シーケンスは 2D Flash, FOV は  $128 \times 128$  mm, スライス厚は 5 mm, ピクセルサイズは  $1 \times 1$  mm とした。同時に Optoacoustics 製 FOMRI タイプ光マイクロホンを用いて歌声も録音した。なお、装置は ATR-Promotions に設置されている Siemens MAGNETOM Prisma fit 3T を用いた。

#### 2.3 喉頭軟骨、舌骨、頸椎の輪郭抽出

Fig. 1 で示すように MRI 画像から舌骨、甲状軟骨、輪状軟骨、頸椎を手動で抽出（トレース）した。このトレースを各音高ごとに行って重ね合わせ、音高の変化に伴う喉頭軟骨と頸椎の位置の変化を分析した。

### 3 結果と考察

#### 3.1 音高変化にともなう喉頭軟骨、舌骨、頸椎の変位

Fig. 2 はトレースした喉頭軟骨、舌骨、頸椎を重ね合わせた結果である。喉頭軟骨と舌骨の動きは声区転換点 F4 で不連続に変化したので、トレースを F4 で二分した。Fig. 2 左では C4～E4 の結果を色付きで示し、それ以外の音高の結果を灰色で示した。Fig. 2 右では F4～G4 の結果を色付きで示し、それ以外の音

\* Examination of the pitch control mechanism utilizing posterior cervical curvature in opera singing, by TODA, Natsuki, TAKEMOTO, Hironori (Chiba Institute of Technology), and TAKAHASHI, Jun (Osaka University of Arts).

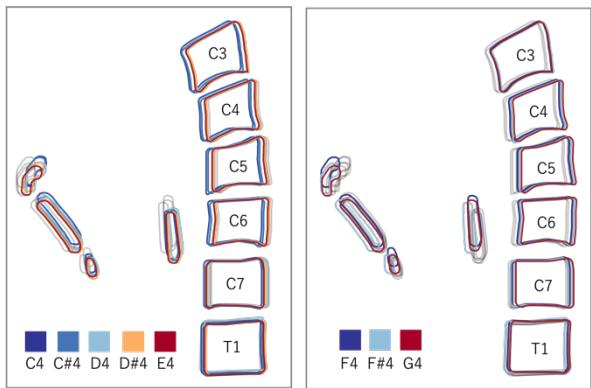


Fig.2 喉頭軟骨、舌骨、頸椎の輪郭抽出結果（左: C4~E4, 右: F4~G4）

高の結果を灰色で示した。なお、発声した音高は提示した音高と±50 cent以内であり、提示した音高通りであったことを確認した。

C4~E4では、頸椎は音高の上昇にともない、第3頸椎(C3)から第6頸椎(C6)を中心に次第に後弯した。舌骨と甲状軟骨は前下方に変位した。一方、輪状軟骨はほとんど変位しなかった。声区転換点より高いF4~G4では、頸椎は音高の上昇にともない、第4頸椎(C4)から第7頸椎(C7)を中心に後弯し、舌骨は前下方に変位した。甲状軟骨はF4, G4, F#4の順で前下方に変位した。輪状軟骨は下方へ変位したが、F#4ではF4とG4と比較して前方へ変位した。また、C4~E4とF4~G4の喉頭軟骨全体の位置を比較すると、より高音域であるF4~G4では、C4~E4よりも前上方に変位した。

### 3.2 音高変化と頸椎の後弯

トレースの結果、この実験参加者では、輪状軟骨に対して甲状軟骨が前下方に変位することが音高を上昇させる要因と考えられる。F#4を除き、輪状軟骨の後板はわずかに上下動したが、後方への回転や前後方向の変位は見られなかった。しかし、舌骨と甲状軟骨は前下方に変位した。これにより、輪状軟骨の上部に位置する披裂軟骨と甲状軟骨の内側に張られている声帯は伸長して張力が増大し、音高が上昇すると推定される。舌骨と甲状軟骨を前下方に変位させる力は、オトガイ舌骨筋が前方に引く力と、胸骨舌骨筋や胸骨甲状筋が下方に引く力の合力と考えられる。これにより、下顎や舌骨を介して頭部には前下方に倒れ込む力が働くと予想される。これに対して頸部を真っすぐ、顔を前に向けた状態を

保つために頸椎の下部が後弯すると考えられる。つまり頸椎の後弯は、舌骨と甲状軟骨を前下方に変位させつつ頭頸部の姿勢を保持するための代償的な運動ではないかと思われる。

この実験参加者では、声区転換点より音高の高いF4~G4で喉頭軟骨全体が前上方に変位していた。その要因の一つに食道の入り口の開放が考えられる。食道の入り口は、実用上の音域の限界に達すると開くことが知られている[6]。内観報告からこの実験参加者の声区転換点はF4でG4が歌唱可能な最高音であることから、F4~G4は実験参加者にとって実用上の音域の限界であったといえる。そのため食道の入口が開き、喉頭を後下方に保つ力を失って、喉頭が前上方に変位したと考えられる。一方で、舌骨と甲状軟骨の前下方への変位と頸椎の後弯は連続していたことから、音高を変化させる動作は声区転換点の上下で変化しなかったと考えられる。

## 4 まとめ

本研究では、喉頭軟骨のコントラストが比較的高い静止画の撮像法を導入し、1名のプロのオペラ歌手の音高変化にともなう舌骨、喉頭軟骨、頸椎の輪郭をトレースして予備的に分析した。その結果、音高を変化させる主要因は輪状軟骨に対して舌骨と甲状軟骨の前下方への変位であり、頸椎の後弯は、頭頸部の姿勢を保持するための代償的な運動ではないかという推察が得られた。今後は実験参加者を増やし、今回得られた結果が他の実験参加者にも見られるか検討する必要がある。

## 謝辞

本研究はJSPS科研費23K11172の支援を受けた。また、実験参加者に感謝する。

## 参考文献

- [1] Sundberg. J, *THE SCIENCE OF THE SINGING VOICE*, 1987.
- [2] Takemoto *et al.*, Proc. Interspeech 2019, 904–908, 2019.
- [3] 竹本ら, 音響学会誌, 80(10), 577–584, 2024.
- [4] 戸田ら, 音講論(春), 681–682, 2024.
- [5] 本多清志, 喉頭, 8(2), 109–115, 1996.
- [6] Sonninen. A, Ann. N. Y. Acad. Sci., 155(1), 68–90, 1968.